

李松松, 李取生, 何宝燕, 等. 8种矿质元素在苗期水稻中的积累特性[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(4): 48-51. Li Songsong, Li Qusheng, He Baoyan, et al. Accumulation characteristics of eight mineral elements in seeding paddy rice [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(4): 48-51.

8种矿质元素在苗期水稻中的积累特性

李松松¹, 李取生^{1,2*}, 何宝燕¹, 李慧¹, 凌玲¹

(1.暨南大学环境工程系, 广东 广州 510632;

2.水土环境毒害性污染物防治与生物修复广东省高校重点实验室, 广东 广州 510632)

摘要:选择广东省近年常见的15个水稻品种,用受污土壤进行盆栽试验,研究了相同外部条件下水稻积累重金属Cd、Cu、Zn和营养矿质元素K、Na、Ca、Mg、Fe的规律。结果显示,Ca、Fe、K、Mg、Na、Cd、Cu、Zn的含量范围为:3 983~6 115, 252.2~732.6, 25 312~33 288, 2 115~3 336, 95.77~2 837, 6.54~24.77, 11.98~21.23, 53.33~97.81 mg/kg, 水稻品种间对重金属Cd、营养矿质元素Fe的吸收累积差异显著,且其变异系数分别达到了33.28%、38.36%。Cd与Ca、Mg及Zn表现出显著的相关性,Cu与Ca、Fe、K、Mg、Zn均有显著相关性,Zn与除K外的其他测试元素均有显著相关性。

关键词:水稻; Cd; 营养矿质元素

中图分类号:X13 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2014.04.010 文章编号:1003-6504(2014)04-0048-04

Accumulation Characteristics of Eight Mineral Elements in Seeding Paddy Rice

LI Songsong¹, LI Qusheng^{1,2*}, HE Baoyan¹, LI Hui¹, LING Ling¹

(1. Department of Environment Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Key Laboratory of Water/Soil Toxic Pollutants Control and Bioremediation of Higher Education of Guangdong Province, Guangzhou 510632, China)

Abstract: In order to study the accumulation characteristics of heavy metal and mineral nutrition elements in paddy rice under the same condition, 15 cultivars of rice which are widely cultivated in Guangdong Province were studied by pot experiment. Results showed that the concentration ranges of Ca, Fe, K, Mg, Na, Cd, Cu, Zn were 3 983~6 115, 252.2~732.6, 25 312~33 288, 2 115~3 336, 95.77~2 837, 6.54~24.77, 11.98~21.23, 53.33~97.81 mg/kg respectively. Significant difference was found in concentration of Cd or Fe in 15 varieties, and the coefficients of variation of them were 33.28% and 38.36% respectively. Cd shows a significant correction with Ca, Mg and Zn. Cu shows a significant correction with Ca, Fe, K, Mg and Zn. Zn shows a significant correction with all tested elements except K.

Key words: rice; Cd; mineral nutrition elements

随着采矿、冶炼、印染和制造等工业的快速发展,工业污水排放及农用化学品的大量使用,使Cd、Cu、Zn等重金属元素在土壤中快速、过量的积累,而由土壤重金属污染导致的食品安全问题引起了广泛的的关注。缺铁已成为影响世界30%人口的严重营养问题,尤其是那些以植物性食物为主要食品的国家和地区,食品的营养问题也成为焦点。稻米是我国的主要粮食之一,全国60%以上的人口以稻米为主食,我国的水稻种植面积约占农作物播种面积的20%,部分地区达

到90%以上,而我国南方存在严重的土壤酸化现象,原来呈酸性的红壤性水稻土也如此,水稻土的酸化可能是稻田中重金属有效性升高的主要原因^[1]。这使得水稻对重金属积累规律的研究十分紧迫,同时重金属和营养矿质元素在水稻中积累差异及相互关系的研究也很重要。

目前,有关重金属和营养矿质元素在土壤中的竞争或协同关系的研究已有较多报道,低镉累积水稻品种筛选方面的研究也日渐丰富,对Cd积累特性的研

《环境科学与技术》编辑部: (网址) <http://fks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) hjkxyjs@126.com

收稿日期: 2013-09-25; 修回 2013-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871154); 中央高校基本科研基金(21612103)

作者简介: 李松松(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境修复技术与应用, (电子信箱) xjdxlss@126.com; * 通讯作者, (电子信箱) liusheng@21cn.com。

究也逐渐深入^[2~7]。但是从水稻品种间吸收转运能力差异的角度,研究重金属和矿质元素在水稻中积累的差异和关系尚不多见。刘建国^[6]的研究发现水稻籽粒 Cd 浓度与水稻植株的总吸 Cd 量呈极显著的线性正相关。He 等^[8]研究表明水稻籽粒的 Cd 浓度与地上部 Cd 浓度具有极显著的相关性,且水稻籽粒的 Cd 浓度与 Cd 分配率(籽粒中 Cd 量占植株总吸收 Cd 的百分比)间没有相关性,选育工作的重点应放在 Cd 的吸收差异上,而不是分配率的差异。史静等^[9]的研究发现,水稻吸收 Cd 总量和 Cd/Zn 比值在苗期已经表现出显著正相关关系,且苗期低 Cd 吸收品种的 Cd/Zn 比值低于高 Cd 吸收品种,同时苗期是 Cd 吸收的关键时期,因此利用苗期筛选低 Cd/Zn 比值水稻品种是一条有效途径。故本项研究以 15 种水稻稻苗(60 d)为研究对象,旨在探明外部条件一致的情况下重金属和营养矿质元素在水稻中积累的差异及相互关系,为从水稻自身遗传特征方面对筛选富营养水稻品种或重金属低累积水稻品种提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻为广东省近年常见的 15 个品种,其中常规稻品种 2 个,杂交稻品种 13 个(两系杂交稻 2 个,三系杂交稻 11 个),种子购自广东华农大种业有限公司、广东省金稻种业有限公司、广东省农科院水稻研究所。品种如下:粤香占、华新占、华优香占、丰优丝苗、培杂泰丰、特优 524、丰优 428、粤杂 889、华优 8830、华优 213、华优 336、华优 8305、天优航七、五优 308、天优 3618。试验用的化学试剂产自天津市大茂化学试剂厂,纯度为分析纯。

1.2 供试土壤

盆栽土壤采自广州郊区污染菜园土,土壤基本理化性质:pH 为 5.45,阳离子交换总量为 7.33 cmol/kg,Cd、Cu、Zn、Ca、K、Mg、Na、Fe 的含量分别为 2.28 mg/kg、24.68 mg/kg、316.5 mg/kg、39.2 g/kg、19.1 g/kg、1.2 g/kg、169.6 g/kg、31.4 g/kg。采集的土壤去除杂质、混匀、自然风干后备用。

1.3 盆栽试验

用清水悬浮法去除未成熟和不实种子,然后用 1:1 000 的多菌灵浸种 24 h,清水洗净催芽。稻种催芽后先在育秧板上育秧,21 d 后移栽至统一规格的桶(高 22 cm,口径 20 cm,每桶盛土 4.5 kg)内,每桶 2 穴,每穴 2 茎,每个品种 3 盆,生长期保持土面 2 cm 水层。分蘖期每盆施用分析纯尿素 0.490 g、KCl 0.279 g。

1.4 样品采集与分析

培养 60 d 后收获稻苗,依次用自来水、去离子水清洗 3 次,自然晾干后称鲜质量,在 75 °C 下烘至恒重,称干质量,磨碎并过 100 目筛。称适量干样,混合 10 mL 硝酸,用微波消解仪(MARS5)消解,最后采用原子吸收分光光度法(岛津 AA7000)测定 Cd、Cu、Zn、K、Na、Ca、Mg、Fe。样品测量过程中,同步处理测定植物标准样品(GSV-1 国家标准参比物质),以进行质量控制,元素测定值均在标准参比物质的允许误差范围内,最终元素含量以干质量计。

1.5 数据处理

试验数据用 Excel 2010 录入,采用 SPSS 19.0 对采集数据进行单因素方差分析、Duncan 多重比较、相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 营养矿质元素和重金属的积累特性

由表 1 可见,不同品种水稻稻苗中营养元素和重金属的含量均存在很显著的差异,Ca、Fe、K、Mg、Na、Cd、Cu、Zn 的含量范围为:3 983~6 115、252.2~732.6、25 312~33 288、2 115~3 336、95.77~2 837、6.54~24.77、11.98~21.23、53.33~97.81 mg/kg。其中营养矿质元素 Fe、Na 及重金属 Cd 累积的变异系数(分别是 37.29%、63.80%、38.73%)最大。

世界 30% 的人口患有贫血病,特别是发展中国家,且大部分是缺铁性贫血(占世界人口的 10%~20%)^[10]。通过食品添加剂和摄入剂片都能解决 Fe 等微量元素的缺乏,但由于费用高难于在发展中国家实现,因此培育富铁水稻是一项可行的办法。目前转基因技术、诱变技术在培育富铁水稻方面取得一些进展,常规育种因其选育的品种产量较主栽品种低,且连续多代大规模育种群体的测定分析成本高,使得近年来相关研究较少。Goto 等^[11]对水稻的研究发现,导入大豆铁转运蛋白的水稻其籽粒含铁量是常规水稻籽粒的 3 倍。但是转基因食品的安全性问题存在很大争议,使得这些转基因产品的应用受到限制。肌醇-6-磷酸在植物种子中广泛存在,农业科学中称为植酸,它能与 Ca、Mg、Fe 等营养矿质元素形成植酸盐,降低其生物有效性,浙江大学的学者利用诱变技术,先后从晚粳稻秀水 110、早籼稻浙辐 906 等水稻中创造了一批低植酸突变体,使得 Fe、Zn 等营养矿质元素更易被吸收利用^[12]。本研究发现,不同品种水稻中 Fe 累积的变异系数达到 33.28%,水稻品种间 Fe 含量变化幅度大,说明在主栽品种中筛选富 Fe 水稻有一定潜力,筛选的富 Fe 品种再结合诱变技术降低植酸含量,这样既能避免转基因技术的安全性问题,又能解决常规育种产量不稳定和高成本问题。

表 1 稻苗中 8 种矿质元素的含量
Table 1 Concentrations of 8 mineral elements in rice

品种	Ca	Fe	K	Mg	Na	Cd	Cu	Zn	(mg/kg, DW)
粤香占	3 983c	339.4fgh	28 254bcd	2 115c	182.5bc	6.77cd	12.49d	53.33c	
华新占	5 503ab	425.0defg	31 033ab	2 974ab	1 168bc	16.82abcd	19.79abc	69.32abc	
华优香占	5 026bc	446.9cdef	29 410bc	2 803ab	769.4bc	20.99abc	16.45abcd	75.66abc	
丰优丝苗	5 210ab	587.3abc	31 345ab	3 095ab	1 798ab	12.31abcd	21.23a	72.00abc	
培杂泰丰	4 947bc	252.2h	27 862bcd	2 959ab	1 265abc	16.04abcd	11.98d	73.54abc	
特优 524	5 208ab	270.8gh	28 658bcd	3 165ab	468.4bc	21.32ab	12.81d	65.81bc	
丰优 428	4 958bc	275.5gh	29 333bc	2 574bc	95.77c	24.77a	13.03d	71.42abc	
粤杂 889	4 767bc	289.6fgh	25 311d	2 869ab	123.9c	18.02abcd	13.66d	73.90abc	
华优 8830	4 776bc	378.8efgh	33 288a	2 823ab	1 125.9bc	6.54d	14.13bcd	56.96c	
华优 213	5 113ab	396.4efgh	31 419ab	2 684bc	1 383abc	12.90abcd	13.40d	80.06abc	
华优 336	4 946bc	732.6a	28 015bcd	2 732abc	1 702abc	13.12abcd	20.41a	97.81a	
华优 8305	6 114a	669.4a	31 187ab	3 336a	2 837a	23.10ab	19.88ab	97.45a	
天优航七	5 741ab	648.8ab	29 404bc	2 670bc	1 745abc	9.35bcd	13.81cd	71.90abc	
五优 308	4 875bc	574.6abc	26 980cd	2 676bc	1 688abc	12.30abcd	14.07bcd	82.29abc	
天优 3618	5 362ab	506.1bcde	28 336bcd	2 952ab	1 682abc	9.90bcd	16.32abcd	94.02ab	
平均数±SD	5 102±484.1	452.9±158.8	29 323±2 046	2 828±286.7	1 202±766.9	14.95±5.79	15.56±3.22	75.70±13.11	
变异系数	9.49%	37.29%	6.98%	10.14%	63.80%	38.73%	20.69%	17.32%	

注: 同列数据后如跟有相同字母, 表示 0.05 水平下采用 Duncan 多重比较没有显著差异。

Cd 是毒性最强的重金属元素之一, 在环境中的活性较强, 且在土壤—植物系统中具有很强的迁移能力, 然后通过食物链进入人体, 具有很大的健康风险^[1]。徐燕玲等^[13]对低 Cd 累积水稻品种的筛选方法研究发现, 水稻品种间 Cd 的累积量存在显著差异, 且在低污染水平下这种差异具有一定的稳定性, 此外水分管理对水稻籽粒中 Cd 的累积影响很大。表 1 可见, 不同水稻品种间 Cd 的积累量存在显著差异, 与徐燕玲等的结果一致, 而且其变异系数达 38.36%, 验证了筛选低镉累积水稻品种的潜力。

2.2 重金属 Cd、Cu、Zn 和营养矿质元素含量的相关性分析

由表 2 可见, 重金属 Cd、Cu、Zn 和营养矿质元素 K、Na、Ca、Mg、Fe 间多数都表现出显著的相关性, Zn 与除 K 外的其他测试元素均有显著相关性, K 仅与 Ca、Mg、Cu 有显著相关性, Na 仅与 Ca、Fe、Zn 有显著相关性, Cu 与 Ca、Fe、K、Mg、Zn 均有显著相关性, Cd 与 Ca、Mg 及 Zn 表现出显著的相关性, 特别是 Ca 与所研究的矿质元素间均表现出显著。

表 2 稻苗中 8 种矿质元素含量间的相关系数
Table 2 Correlation coefficients of 8 mineral elements in rice

矿质元素	Ca	Fe	K	Mg	Na	Cd	Cu
Fe	0.440**						
K	0.455**	0.158					
Mg	0.704**	0.226	0.580**				
Na	0.294*	0.441**	-0.067	0.125			
Cd	0.528**	0.033	0.051	0.465**	0.047		
Cu	0.591**	0.602**	0.447**	0.483**	0.273	0.27	
Zn	0.519**	0.464**	0.067	0.390**	0.443**	0.489**	0.557**

注: * 表示在 0.05 水平(双侧)显著相关; ** 表示在 0.01 水平(双侧)显著相关。

曾亚文等^[14]研究云南稻种矿质元素与品质性状时发现, Ca 与 Mg、Fe、Mn 含量呈极显著的正相关, K 与 Mg 也具有极显著的正相关关系。这与笔者试验结果一致。陈际型等^[15]的研究发现, 水稻在低盐基土壤上, K、Ca、Mg 的三角交互作用在养分吸收上是一种协同作用。这与笔者试验结果一致。Jiang 等^[16]的研究显示, Na 与 Ca、Mg、Fe, Zn 与 Ca、Mg、Fe 与 K、Ca、Mg、Zn 含量间呈显著正相关, 这与本研究结果一致, 但 Cu 与 K、Mg 含量呈显著负相关, 这与本研究结果不同。Bughio 等^[17]的研究显示水稻的 Fe 转运蛋白不仅能够转运 Fe, 而且能够转运 Mn、Zn、Cd。Kerkeb 等^[18]的研究也表明, IRT (iron regulated transporter) 基因家族不仅在 Fe 的转运中起到关键作用, IRT1 基因还参与调控其他二价金属的转运。有研究表明植物对金属元素的吸收运输在很大程度上是由一些共同的转运蛋白完成的, 这些蛋白包括 ZIP 转运蛋白家族 (the zinc-regulated transporter, iron-regulated transporter protein family)、CDF 蛋白家族 (the cation diffusion facilitator family)、CCC1 蛋白家族 (the Ca^{2+} -sensitive cross completer 1 family) 等^[19]。以上结果显示, 各个矿质元素的吸收转运途径不是唯一的, 而且其中一种转运途径能够转运多种元素, 结合表 1 和表 2 的数据, 笔者认为这些转运途径 (离子通道、铁锌转运蛋白) 对各个营养矿质元素和重金属的转运都有作用, 只是一种途径在某一特定元素的转运中作用大小不同。表 1 中不同品种间矿质元素积累量存在的显著差异, 可能就是由于这些品种中控制各个转运途径的基因表达程度不同。由表 2 可见, 不同水稻品种中重金属 Cd、Cu、Zn 和营养矿质元素 K、Na、Ca、Mg、Fe 间多数都

表现出显著的相关性,这个现象可能是由于这些营养矿质元素及重金属的部分转运途径是一样的,它们之间的相关性越高,说明对它们同时起作用的转运途径越多。Akimasa 等^[20]采用基因沉默技术破坏 Nramp5 的表达,使得水稻中 Cd 的含量不到原来的 1/10,而糙米中 Mn 的含量也不到原来的 1/8,产量较正常水稻降低了 90%。如果能进一步研究将水稻吸收转运营养矿质元素和重金属的多种途径建模,确定各个途径对水稻吸收转运各种元素的作用,不仅能使筛选富营养水稻品种及重金属低累积水稻品种的工作更高效,也能结合基因沉默等新技术提高育种水平。

3 结论与展望

水稻在富 Fe、低 Cd 累积方面有很大的潜力,筛选这类品种能满足不同的需要,具有广泛的应用价值。

营养矿质元素和重金属可能有多种相同的吸收转运途径,这说明在筛选富 Fe 等微量元素的品种时需要考虑有毒重金属富集的风险,筛选低重金属累积品种时不仅要降低重金属的含量还应考虑营养元素对稻米品质的影响。

【参考文献】

- [1] 龚伟群,潘根兴.中国水稻生产中 Cd 吸收及其健康风险的有关问题[J].科技导报,2006,24(5):43~48.
Gong Weiqun, Pan Genxing. Issues of grain Cd uptake and the potential health risk of rice production sector of China[J]. Science and Technology Review, 2006, 24 (5) : 43~48. (in Chinese)
- [2] Liu Jianguo, Qian Min, Cai Guoliang, et al. Uptake and translocation of Cd in different rice cultivars and the relation with Cd accumulation in rice grain[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 143 (1~2) : 443~447.
- [3] Yu Hui, Wang Junli, Fang Wei, et al. Cadmium accumulation in different rice cultivars and screening for pollution-safe cultivars of rice[J]. Science of the Total Environment, 2006, 370 (2~3) : 302~309.
- [4] 刘侯俊,梁吉哲,韩晓日,等.东北地区不同水稻品种对 Cd 的累积特性研究[J].农业环境科学学报,2011,30(2):220~227.
Liu Houjun, Liang Jizhe, Han Xiaori, et al. Accumulation and distribution of cadmium in different rice cultivars of north-eastern China[J]. Journal of Agro-environment Science, 2011, 30 (2) : 220~227. (in Chinese)
- [5] 曾翔,张玉烛,王凯荣,等.不同品种水稻糙米含镉量差异[J].生态与农村环境学报,2006,22(1):67~69,83.
Zeng Xiang, Zhang Yuzhu, Wang Kairong, et al. Genotype difference of brown rices in Cd content[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2006, 22 (1) : 67~69, 83. (in Chinese)
- [6] 刘建国.水稻品种对土壤重金属镉铅吸收分配的差异及其机理[D].扬州:扬州大学,2004.
Liu Jianguo. Variations among Rice Cultivars in the Uptake and Translocation of Cadmium and Lead from Soil and the Mechanisms[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2004. (in Chinese)
- [7] 刘志彦,田耀武,陈桂珠.矿区周围稻米重金属积累及健康风险分析[J].生态与农村环境学报,2010,26 (1): 35~40.
Liu Zhiyan, Tian Yaowu, Chen Guizhu, et al. Accumulation of heavy metals in rice growing around mining area and its human risk analysis[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26 (1) : 35~40. (in Chinese)
- [8] He Junyu, Zhu Cheng, Ren Yanfang, et al. Genotypic variation in grain cadmium concentration of lowland rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2006, 169 (5) : 711~716.
- [9] 史静,李正文,龚伟群,等.2 种常规水稻 Cd、Zn 吸收与器官分配的生育期变化:品种、土壤和 Cd 处理的影响[J].生态毒理学报,2007,2(1):32~40.
Shi Jing, Li Zhengwen, Gong Weiqun, et al. Uptake and partitioning of Cd and Zn by two non-hybrid rice cultivars in different growth stages: effect of cultivars, soil type and Cd spike[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2007, 2 (1) : 32~40. (in Chinese)
- [10] Baynes R D, Bothwell T H. Iron deficiency[J]. Annual Review of Nutrition, 1990, 10: 133~148.
- [11] Goto F, Yoshihara T, Shigemoto N, et al. Iron fortification of rice seed by the soybean ferritin gene[J]. Nature Biotechnology, 1999, 17 (3) : 282~286.
- [12] 王雪艳,左晓旭,舒小丽,等.富铁水稻研究进展[J].核农学报,2005,19(5):404~408.
Wang Xueyan, Zuo Xiaoxu, Shu Xiaoli, et al. Advances in high iron rice[J]. Acta Agriculture Nucleate Sinica, 2005, 19 (5) : 404~408. (in Chinese)
- [13] 徐燕玲,陈能场,徐胜光,等.低镉累积水稻品种的筛选方法研究——品种与类型[J].农业环境科学学报,2009,28(7):1346~1352.
Xu Yanling, Chen Nengchang, Xu Shengguang, et al. Breeding rice cultivars with low accumulation of cadmium: cultivars versus types[J]. Journal of Agro-environment Science, 2009, 28 (7) : 1346~1352. (in Chinese)
- [14] 曾亚文,申时全,汪禄祥,等.云南稻种矿质元素含量与形态及品质性状的关系[J].中国水稻科学,2005,19(2):127~131.
Zeng Yawen, Shen Shiquan, Wang Luxiang, et al. Relationship between morphological and quality traits and mineral element content in Yunnan rice[J]. Chinese J Rice Sci, 2005, 19 (2) : 127~131. (in Chinese)
- [15] 陈际型,宣家祥.低盐基土壤 K、Ca、Mg 的交互作用对水稻生长与养分吸收的影响[J].土壤学报,1999,36(4):434~439.

(下转第 61 页)

0.15 mmol/L 时,污水中的钾 80%由活性污泥吸收,20%由磷酸铁吸收。相较于外加钾离子,改变投药量、改变连续投药为间歇投药来控制系统中的磷酸铁含量在实际工程中更经济更可行。生物系统能够耐受的磷酸铁含量有最大值,一旦超过则除磷性能下降。可保证除磷效果的最大磷酸铁含量有待深入研究。

3 结论

(1) 磷酸铁含量越高则钾吸附率越高,吸附量越小。磷酸铁含量 0.075~0.15 mmol/L 时,磷酸铁吸钾量占活性污泥吸钾量的 21%~29%。污水的共存阳离子可减弱磷酸铁对钾离子的吸附。

(2) Freundlich 方程能较好描述磷酸铁沉淀对钾离子的吸附过程,磷酸铁对钾离子的吸附强度弱,吸附动力学特征符合伪二级动力学模型。

(3) 污水中的磷酸铁厌氧时有 35%溶解,溶出的 Fe^{2+} 20%以离子态存在,溶出的磷不能在好氧段完全沉淀,出现了磷冗余。

(4) 混合污泥中磷酸铁含量升高至一定程度时,会对活性污泥吸钾产生拮抗作用,除磷效果变差,有必要对系统中的磷酸铁含量加以控制。污水中的钾 80%由活性污泥吸收,20%由磷酸铁吸附。

【参考文献】

- [1] 姚婧梅,张智,任丽平,等.化学除磷中 Fe(III) 和 Fe(II) 盐对活性污泥系统的影响[J].中国给水排水,2012,28(9):20~25.

(上接第 51 页)

- Chen Jixing, Xuan Jiaxiang. Effect of interactions of K, Ca and Mg applied to soils with low base content on growth and nutrient uptake by rice plant[J]. Acta Pedologica Sinica, 1999, 36(4):434~439. (in Chinese)
- [16] Jiang S L, Wu J G, Feng Y, et al. Correlation analysis of mineral element contents and quality traits in milled rice (*Oryza Sativa L.*) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(23):9608~9613.
- [17] Bughio N, Yamaguchi H, Nishizawa N K, et al. Cloning an iron-regulated metal transporter from rice[J]. Journal of Experimental Botany, 2002, 53(374):1677~1682.

- Yao Jingmei, Zhang Zhi, Ren Liping, et al. Effect of Fe(III) salt and Fe(II) salt on activated sludge system during chemical phosphorus removal[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(9):20~25. (in Chinese)
- [2] 黄自力,肖晶晶,李密.化学沉淀-磁絮凝深度快速除磷的研究[J].武汉科技大学学报,2009,32(1):102~105.
- Huang Zili, Xiao Jingjing, Li Mi. Further and faster removal of phosphorus by chemical precipitation-magnetic flocculation [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2009, 32(1):102~105. (in Chinese)
- [3] R Barat, T Montoya, A Seco, et al. The role of potassium, magnesium and calcium in the enhanced biological phosphorus removal treatment plants[J]. Environmental Technology, 2005, 26(9):983~992.
- [4] 姜欣欣.基于 A/O/A 运行模式的 SBR 工艺脱氮除磷效能及其微生物特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [5] 刘绮.环境化学[M].北京:化学工业出版社,2003.
- Liu Qi. Environmental Chemistry [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [6] 樊杰,胡晗.化学铁盐辅助除磷对生物除磷的影响研究[J].环境科学与技术,2013,36(2):41~45.
- Fan Jie, Hu Han. Effect of chemical addition on biological phosphorus removal system[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(2):41~45. (in Chinese)
- [7] C Schonborn, H D Bauer, I Roske. Stability of enhanced biological phosphorus removal and composition of poly-phosphate granules[J]. Water Research, 2001, 35(13):3190~3196.
- [18] Kerkeb L, Mukherjee I, Chatterjee I, et al. Iron induced turnover of the arabidopsis iron-regulated transporter1. metal transporter requires lysine residues[J]. Plant Physiology, 2008, 146(4):1964~1973.
- [19] 李春俭.高级植物营养学[M].北京:中国农业大学出版社,2008:300~312.
- Li Chunjian. Senior Plant Nutrition[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2008:300~312. (in Chinese)
- [20] Sasaki A, Yamaji N, Yokosho K, et al. Nramp5 is a major transporter responsible for manganese and cadmium uptake in rice[J]. The Plant Cell, 2012, 24(5):2155~2167.